

BEFÜLLT, BEDRÜCKT UND EXPLODIERT – GEFÄHRDUNGSBETRACHTUNG VON WASSERRAKETEN

N. M. Riedel¹, J. Richter¹, S. Fischer von Mollard², F. Wallner², F. Fischer²

¹DLR, RSC³, Eugen-Sänger-Str. 50, 29328 Faßberg, Deutschland

²DLR_School_Lab Braunschweig, Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Bei dem künftigen Experiment „Space Launch“ wird im DLR_School_Lab in Braunschweig das Rückstoßprinzip und die Funktionsweise von Raketen Schülerinnen und Schülern erläutert. Hierfür wurde ein Schubprüfstand für Wasserraketen entwickelt, der auf einer PET-Flasche basiert, die als Druckkörper für die Treibstoffe Wasser und Luft dient. Vor dem Einsatz des Prüfstandes im regulären Betrieb des DLR_School_Lab wurden zum Nachweis der Sicherheit Funktions- und Qualifizierungstests auf dem Raketentriebwerksprüfstand „Viererblock“ des DLR Trauen durchgeführt. Hierbei konnte die PET-Flasche in einer professionellen Umgebung in Anlehnung an typische Qualifizierungsverfahren von Druckbehältern in Raumfahrtanwendungen getestet werden. Ebenfalls konnte die Konstruktion des Schubprüfstands aufgrund der gewonnen Erkenntnisse modifiziert und optimiert werden, um eine sichere Durchführung der Versuche auch beim Versagen der PET-Flasche zu gewährleisten. Somit ist in der Zukunft eine Anwendung des Schubprüfstandes im DLR_School_Lab Braunschweig möglich und die Begeisterung des Nachwuchses für MINT-Fächer kann gefördert werden.

1. EINLEITUNG

Im Rahmen des neuen Experiments „Space Launch“ am außerschulischen Lernort DLR_School_Lab Braunschweig sollen Schülerinnen und Schüler unter anderem das Rückstoßprinzip und das Funktionsprinzip von Raketen kennenlernen. Ziel des DLR_School_Lab Braunschweig am Standort des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt ist hierbei bei den Kindern und Jugendlichen das Interesse und die Begeisterung für Naturwissenschaften, Forschung und Technik zu wecken, die Anwahl der MINT-Fächer in der Schule fördern und sie für einen beruflichen Werdegang in dem Bereich zu motivieren. Deshalb soll das Experiment nicht nur experimentell das Wissen rund um das Rückstoßprinzip als Funktionsprinzip von Raketen und die Bestimmung des größtmöglichen Schubs durch das Finden des optimalen Mischungsverhältnisses aus der „Treibstoffkombination“ Wasser und Luft vermitteln, sondern aus Schülersicht auch möglichst spektakulär und damit begeisternd und einprägsam sein. Aufgrund der unmittelbaren Flughafennähe scheidet der Start von Wasserraketen oder alternativ von Raketen mit Feststofftreibsätzen aus. Deshalb wurde ein Schubprüfstand mit einer vertikal gefesselten Wasserrakete als grundlegendes Design ausgewählt. Dies greift wiederum thematisch reale Schubprüfstände in der DLR-Forschung an den DLR-Standorten Trauen und Lampoldshausen auf.

Für die erste Durchführung von Tests auf dem Schubprüfstand wurde das DLR Trauen mit dem Raketentriebwerksteststand „Viererblock“ als sichere Umgebung ausgewählt. Neben den ersten Funktionstests wurden in der Testkampagne auch die maximalen Belastungstests durchgeführt. Ziel der Tests ist es die

Sicherheit des Schubprüfstandes nachzuweisen, Informationen und Kennwerte für die Gefährdungsbeurteilung zu ermitteln und somit eine stets sichere Durchführung des Experiments am DLR_School_Lab in Braunschweig zu ermöglichen. Die Hauptgefährdung des Schubprüfstandes geht von der bedrückten PET-Flasche aus. Diese kann als Drucktank eingestuft werden, weshalb sich bei der Qualifizierung des Schubprüfstandes an der typischen Qualifizierung von Drucktanks orientiert wurde.

Zuerst wird auf die Qualifizierung von Drucktanks im Allgemeinen eingegangen, bevor der Aufbau des Schubprüfstandes erläutert wird. Anschließend wird die experimentelle Durchführung der Testkampagne beim DLR in Trauen erläutert. Danach werden die Testergebnisse vorgestellt und eine Kurzzusammenfassung bildet den Abschluss.

2. QUALIFIZIERUNG VON DRUCKTANKS

Für die Qualifikation von Druckbehältern gibt es unterschiedliche Normen, die verwendet werden. In Deutschland stellt die Druckgeräte-Richtlinie 2014/68/EU [1] und die europäische Norm DIN EN 13445 [2] eine Basis hierfür dar. Im amerikanischen Raum hat sich der ASME-Code [3] durchgesetzt. Aufgrund der abweichenden Anforderungen, die ein fliegender Druckbehälter gegenüber herkömmlichen Druckbehältern am Boden aufweist (z.B. Gewichtsanforderungen), wurden die Tests in Anlehnung an die amerikanische Norm ANSI/AIAA S-080A-2018 [4] durchgeführt. Diese ist speziell für die

Verwendung von Druckbehältern in Raumfahrtanwendungen konzipiert.

Nach Ref. [4] werden für die Testdurchführung unterschiedliche Drücke in Abhängigkeit vom Betriebsdruck (MEOP: Maximum Expected Operating Pressure) definiert:

$$DBP = 1.5 \cdot MEOP \quad (1)$$

$$PP = 1.25 \cdot MEOP \quad (2)$$

Der Desintegrationsdruck (DBP: Design Burst Pressure) beschreibt den Druck, der vom Druckbehälter maximal ausgehalten werden muss ohne, dass es zu einer Desintegration kommt. Der Prüfdruck (PP: Proof Pressure) beschreibt den Standard Druck für die Prüfung.

Durch die Norm [4] werden folgende Prüfungen vorgeschrieben:

- Zerstörungsfreie Prüfung: Visuelle Inspektion des Druckbehälters
- Physikalische Prüfung: Messung aller relevanten Abmessungen, wie z. B. des Durchmessers und der Länge des Druckbehälters
- Massenprüfung: Messung der Druckbehältermasse
- Volumenprüfung: Messung des tatsächlichen Volumens des Druckbehälters
- Betriebstest: Bedrückung des Druckbehälters bis zum PP und halten des Druckes von 5 min
- Leakageprüfung: Bedrückung des Druckbehälters bis zum MEOP und Überprüfung der Leakage
- Zyklustests: Bedrückung des Druckbehälters mit dem MEOP, mindestens 13 Zyklen oder das Vierfache der Lebenszeit
- Akustik und Vibrationstest
- Bersttest: Bedrückung des Druckbehälters bis zum DBP, halten des Druckes bis dieser sich stabilisiert hat, danach Erhöhung des Druckes bis zur Desintegration
- Stabilitätsprüfung: Widerstand gegen externe Lasten

3. SCHUBPRÜFSTAND

Für die Konstruktive Umsetzung des Schubprüfstandes der Wasserraketen wird zunächst das Versuchsprinzip vorgestellt. Anschließend wird das Sicherheitskonzept des Prüfstandes, der mechanische Aufbau, das Funktionsprinzip der Kupplungs- und Entladeeinheit sowie das Messprinzip für die Schubmessung präsentiert.

3.1 Versuchsprinzip

Das Messprinzip beruht auf dem gezielten Einleiten der Schubkraft auf einen Kraftsensor, die entsteht, wenn Wasser und Druckluft aus einer unter Druck stehenden PET-Flasche entweicht. Die Flasche ist vertikal ausgerichtet, die Düse zeigt nach unten, und wird über eine Schnellkupplung mit Druckluft beaufschlagt. Nach Erreichen des gewünschten Fülldrucks löst ein Bowdenzugmechanismus die Kupplung, der Wasser-Luft-Gemischstrahl setzt Schub frei, der gegen eine S-Form-Kraftmessdose wirkt. Die Wahl einer handelsüblichen PET-

Flaschen begründet sich im Betrieb bei Schülerversuchen einerseits durch die niedrigen Kosten bei bis zu 30 Tests pro Tag, andererseits durch das geringe Sicherheitsrisiko gegenüber chemischen Antrieben und schließlich durch die Möglichkeit, den Schubverlauf durch Variation von Füllmenge und Druck didaktisch flexibel zu gestalten.

3.2 Sicherheitskonzept

Da PET-Flaschen als Druckbehälter genutzt werden, besteht die Gefahr des Berstens bei Überdruck und damit verbunden das Risiko unkontrolliert wegfliegender Fragmente oder Bauteile. Um dem entgegenzuwirken, verfügt der Teststand über einige Sicherheitsmechanismen. Die Flasche wird in einem transparenten PVC-Zylinder untergebracht, der als Splitterschutz dienen soll und die Flasche axial frei führt. Unterhalb der Düse befindet sich ein mit Wasser gefülltes Auffangbecken, das die abgeworfenen Kupplungsteile und austretendes Wasser aufnimmt. Eine schwenkbare Verschlussplatte unterhalb des Zylinders ermöglicht zudem schnellen Zugang zur Flasche und eine Aussparung sorgt dafür, dass Kupplung und Anschluss auch bei geschlossener Platte unterhalb der Platte sind.

3.3 Mechanischer Aufbau

Der Prüfstand (siehe BILD 1) basiert auf einem modularen Metall-Profilrahmen mit 50 mm x 50 mm Querschnitt. Drei senkrechte Profile tragen einen oberen Profilkranz, der die Schubkraft aufnimmt und in die Unterkonstruktion ableitet. Mittig ist ein transparenter PVC-Zylinder aufgehängt, der die PET-Flasche beim Druckaufbau und der Entladung führt und zugleich Splittersicherheit bietet. Ein Kegeladapter verbindet den Flaschenboden zentrisch mit der Kraftmessdose. Die quaderförmige Unterkonstruktion besteht aus 40 mm x 40 mm Metallprofilen, auf ihr ruht eine Stahlplatte. Der Aufbau ist mit vier Rollen ausgestattet, um die Mobilität des Aufbaus sicherzustellen.

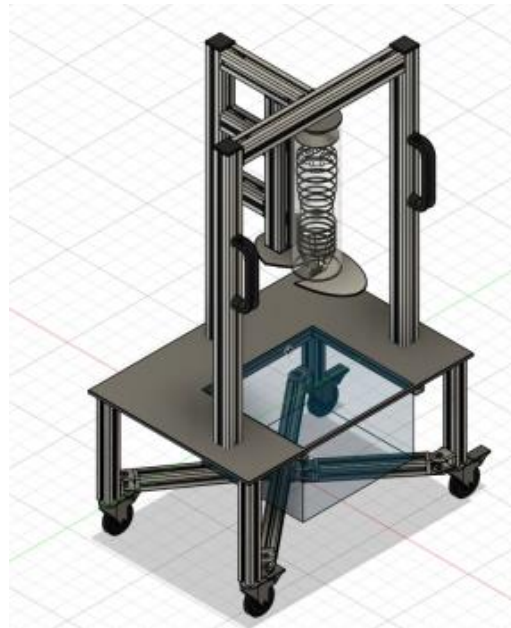


BILD 1. Mechanischer Aufbau des Schubprüfstandes für Wasserraketen

3.4 Kupplungs- und Entladeeinheit

Die Druckzufuhr und -ableitung erfolgt über eine mit dem Gartenbewässerungssystem GARDENA-kompatible Schnellkupplung der Firma Raketenmodellbau Klima GmbH (siehe BILD 2). Diese umfasst einen auf das Flaschengewinde schraubbaren Adapter und das Gegenstück mit integriertem Druckluftanschluss sowie einen Bowdenzugmechanismus, der beim Auslösen die Kupplung entriegelt und so den Schubimpuls freigibt.

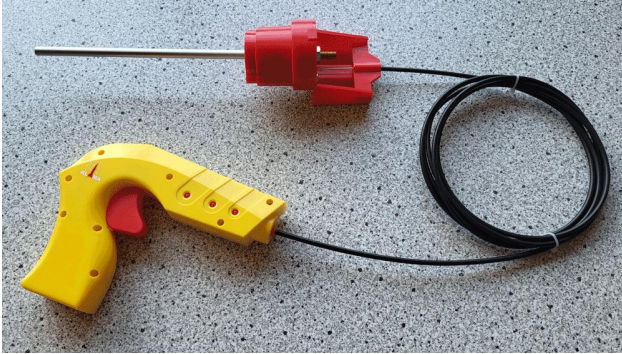


BILD 2. Auslöseeinheit der Wasserrakete von der Firma Raketenmodellbau Klima GmbH

3.5 Kraftmessung

Die Erfassung der Schubkraft übernimmt ein S-Form-Kraftsensor mit einer Nennkraft von 500 N und Genauigkeitsklasse 0,1%. Die Krafteinleitung erfolgt über M5-Innengewinde, der elektrische Anschluss über ein 2 m langes STC-31V-4-Kabel. Der verwendete Sensor hat eine Überlastkapazität von 200% seiner Nennkraft. Die Messelektronik ist am Metallprofil befestigt.

4. EXPERIMENTELLER AUFBAU

Für die Durchführung der ersten Funktionstests und die Qualifizierung der PET-Flasche als Druckbehälter wurde der Prüfstand „Viererblick“ beim DLR in Trauen ausgewählt. Dieser wird kurz vorgestellt. Danach wird der Aufbau der Druckversorgung für die Qualifizierungstests gezeigt und die verwendete Sensorik sowie, die Durchführung der Tests erläutert.

4.1. Prüfstand „Viererblick“ beim DLR Trauen

Der DLR-Standort Trauen umfasst eine Fläche von 82 Hektar und wurde im Jahr 1937 gegründet. Einen vollständigen Überblick über die Geschichte des Standortes ist in Ref. [5] zu finden. Bis 1945 fanden richtungsweisende Forschungen an Raketenantrieben, Ramjets sowie am suborbitalen Raumflugkonzept „Silbervogel“ statt. Nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs wurde das Gelände von britischen Streitkräften übernommen. Sämtliche nutzbare Ausrüstung wurde demontiert und abtransportiert, die verbliebenen Testeinrichtungen wurden zerstört. In den späten 1950er Jahren erfolgte eine Aufteilung des Standorts; im Jahr 1958 wurden Teilbereiche der Bundeswehr sowie der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFL) überlassen. Ab 1959 wurde die Forschung wieder aufgenommen – mit einem geteilten Fokus auf

aerodynamische Untersuchungen und die Erprobung von Raketentriebwerken. Für Letztere wurde der Raketenteststand „Viererblick“ errichtet. In den 1960er Jahren wurde am Standort zudem die Oberstufe der Europa-1-Rakete entwickelt. Mit der Einstellung des Programms im Jahr 1970 wurde der Standort weitgehend stillgelegt. Eine Reaktivierung im Bereich der Raketentriebwerke erfolgte erst 2010 durch das DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, das den Standort seither wieder als Forschungs- und Versuchseinrichtung nutzt. Im Jahr 2020 wurde zusätzlich das Responsive Space Cluster Competence Center (RSC³) des DLR am Standort gegründet, dass die Forschung kontinuierlich fortführt und erweitert [5].

Der „Viererblick“ setzt sich aus vier Testzellen, zwei Tankräumen und einem Kontrollraum zusammen, die in BILD 3 dargestellt sind. Zwei der Testzellen sind für Feststofftriebwerke mit einer Treibstoffmasse von bis zu 1 Tonne, die anderen beiden sind für Tests mit Hybridraketenantrieben, deshalb besitzen sie zusätzliche Räume für die Unterbringung des flüssigen Oxidators. Zurzeit können Hybridraketenantriebe mit einem Schub von bis zu 15 kN getestet werden. Das Versorgungssystem für den Oxidator ist dabei für bis zu 98 % Wasserstoffperoxid (H_2O_2) ausgelegt. Maximal 200 Liter hochkonzentriertes Wasserstoffperoxid können mit einem Volumenstrom von bis zu 7 l/s und einem Förderdruck von bis zu 100 bar zur Verfügung gestellt werden. Seit neuestem ist auch eine Druckluftversorgung von bis zu 1000 bar für die Qualifizierung von Druckbehältern am „Viererblick“ verfügbar. Verschiedene Hybridtriebwerke wie zum Beispiel unterschiedliche Versionen des AHRES-Triebwerks [6] und das VISERION-Triebwerk [7] konnten hier bereits erfolgreich getestet werden [5].



BILD 3. Ansicht auf den Prüfstand „Viererblick“

Der „Viererblick“ wird regelmäßig von verschiedenen studentischen Projektgruppen genutzt. Die studentische Gruppe ERIG der Technischen Universität Braunschweig konnte bereits mehrere entwickelte Hybridtriebwerke in der Versuchsanlage testen [5].

4.2. Druckversorgung

Der Fluidplan der Druckversorgung ist in BILD 4 gezeigt. Für die Bedrückung wurde eine Stickstoffflasche mit einem

Fülldruck von 200 bar verwendet, die über ein Druckregelventil an das System angeschlossen wurde. Normalerweise wird der Druckaufbau des Schubprüfstandes mit einer handelsüblichen Fahrradpumpe realisiert, mit Hinblick auf die geplanten Zyklustests stellt diese Variante jedoch nicht die beste Option dar, weshalb auf eine Stickstoffflasche zurückgegriffen wurde. Der Anschluss an den Prüfstand des DLR_School_Lab erfolgte über ein Autoventil, wobei mehrere Verbindungsstücke zur Anpassung an die vorhandene Schnittstelle benötigt wurden. Zur Sicherstellung eines kontrollierten Druckabbaus im Notfall wurde ein Notablasshahn (K2, siehe BILD 3) integriert, der eine schnelle Entlastung des Systems aus sicherer Entfernung von mehreren Metern ermöglichte.

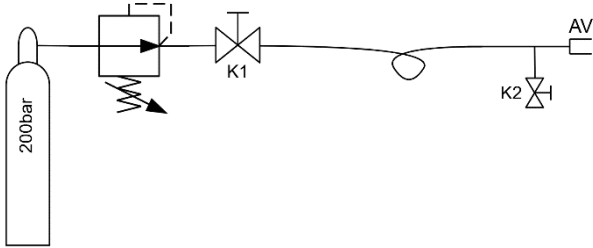


BILD 4. Aufbau des Drucksystems

4.3. Sensorik

Der Druck auf dem System wurde mittels des Druckregelventils manuell eingestellt. Dieses verfügt über zwei Manometer, sodass der Druck der Stickstoffflasche und der Druck im System abgelesen werden können. Für die Schubmessung wurde der Kraftsensor aus Abschnitt 3.5 verwendet. Um eine visuelle Aufzeichnung der Tests zu realisieren, wurden Video- und Fotoaufnahmen gemacht. Außerdem wurden mit einer High-Speed-Kamera Aufnahmen aufgezeichnet. Für eine erste Einschätzung der Lautstärke wurden Schallmessgeräte neben dem Prüfstand positioniert.

4.4. Durchführung

Für die experimentelle Qualifizierung der Wasserrakete als Druckbehälter werden die verschiedenen Prüfungen aus Abschnitt 2 durchgeführt. Hierbei wird auf einen Akustik- und Vibrationstests, sowie ein Stabilitätstest verzichtet, da es keine besonderen Anforderungen diesbezüglich gibt. Die definierten Testdrücke der Wasserrakete sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Druck	Wert [bar]
MEOP	8
PP	10
DBP	12

TAB. 1 Testdrücke nach Normdefinition

5. ERGEBNISSE

Die Präsentation der Testergebnisse ist in die unterschiedlichen Testverfahren nach Abschnitt 2 aufgeteilt.

5.1. Zerstörungsfreie Prüfung

Bei der zerstörungsfreien Prüfung der PET-Flasche wurde diese optisch untersucht. Es konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. In BILD 5 ist eine der verwendeten PET-Flaschen vor dem Test abgebildet.



BILD 5. PET-Flasche vor dem Test

5.2. Physikalische Prüfung

Die relevanten Abmessungen der PET-Flasche sind in Tabelle 2 aufgeführt. Das Anschlussgewinde der Flasche an den Schubprüfstand ist über ein Flaschengewinde mit dem Durchmesser von 28 mm gewährleistet.

Abmessung	Wert [mm]
Länge	263,5
Durchmesser	78,3

TAB. 2 Abmessungen der PET-Flasche

5.3. Massenprüfung

Die PET-Flasche hat laut Hersteller eine Masse von 40 g. Dies konnte mit einer Gewichtsmessung der Flasche von 39,7 g im Rahmen der Unsicherheiten bestätigt werden.

5.4. Volumenprüfung

Das Flaschenvolumen des Herstellers wird mit 1l angegeben. Bei Füllung der gesamten PET-Flasche mit Wasser wird ein Volumen von 1111,2 cm³ erreicht. Das tatsächlich mögliche Volumen ist somit 10 % größer.

5.5. Betriebstest

Für den Betriebstest wurde die Flasche auf einen Druck von 11 bar bedrückt. Dieser Druck liegt leicht oberhalb des PP und ist somit ebenfalls ausreichend. Der Druck wurde für mehrere Minuten gehalten und anschließend wurde der

Kupplungsmechanismus ausgelöst.

5.6. Leckageprüfung

Für die Überprüfung der Dichtheit des Druckbehälters unter Druck wurde ein Leckagetest durchgeführt. Hierfür wurde die PET-Flasche mit einem Druck von 8 bar bedrückt und es wurde während des Haltens überprüft, ob es zu Leckagen des Wassers kommt. Die Flasche selber ist vollständig dicht. Nur während der Zyklustests kam es manchmal zu einer kleinen Leckage im Bereich der Kupplung, wenn das Dichtungsgummi der GARDENA Kupplung durch die kalte Stickstoffbedrückung beschädigt wurde. Dies konnte durch ein Austauschen des Kupplungsbauteils gelöst werden. Es ist somit von einer Dichtheit der Flasche auszugehen.

5.7. Zyklustest

Für die Zyklustests wurde die PET-Flasche jedes Mal mit einer definierten Wassermenge von 1/3 des Gesamtvolumens befüllt, auf einen Druck von 8 bar bedrückt und nach einer Haltezeit von 30 s ausgelöst. Es wurden insgesamt 117 Zyklen mit der gleichen PET-Flasche durchgeführt, bevor der Test abgebrochen wurde, da die Zykluszahl als ausreichend befunden wurde. Die PET-Flasche hat leichte optische Veränderungen aufgewiesen, es wäre jedoch eine weitere Durchführung möglich gewesen.

Die aufgezeichneten Schubkurven unterscheiden sich leicht zwischen den einzelnen Zyklen. In BILD 6 sind beispielsweise drei aufgezeichnete Schubkurven des Kraftsensors abgebildet. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Sensordaten gemittelt wurden. Der mittlere Schub der Wasserrakete liegt bei 9 bis 12 N über einer Zeit von 35 bis 40 s. Die Schubkurven steigen zu Beginn leicht an, verlaufen dann konstant und haben alle am Ende einen Peak in der Höhe von ungefähr 40 N. Die Kurven zeigen, dass trotz des einfachen Aufbaus der Schubprüfstandes mit der Wasserrakete eine Reproduktion der Ergebnisse möglich ist.

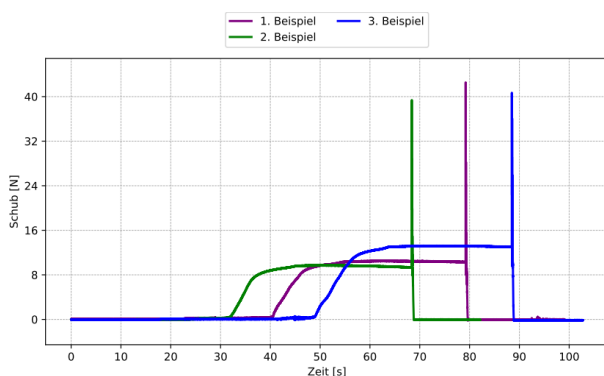


BILD 6. Exemplarische Schubkurven des Schubprüfstandes aufgezeichnet während der Zyklustests

In BILD 7 sind Fotoaufnahmen der High-Speed-Kamera von einer normalen Auslösung der Kupplungseinheit und dem Entleeren der Wasserrakete gezeigt. Die Kamera hat den Testlauf mit einer Bildrate von 500 fps aufgezeichnet. Im oberen linken Bild von BILD 7 ist die PET-Flasche auf

dem Schubprüfstand vor dem Auslösen im bedrückten Zustand zu sehen. Im oberen rechten Bild ist die Kupplung (rotes Bauteil) bereits ausgelöst und fällt nach unten in Richtung des Auffangbehälters. Im unteren linken Bild hat sich ein stationärer Wasserstrahl aus der PET-Flasche ausgebildet und die Kupplung ist bereits im Auffangbecken gelandet. Das untere rechte Bild zeigt das Ende des Tests. Hier spritzt nun auch Wasser aus dem Auffangbecken heraus.

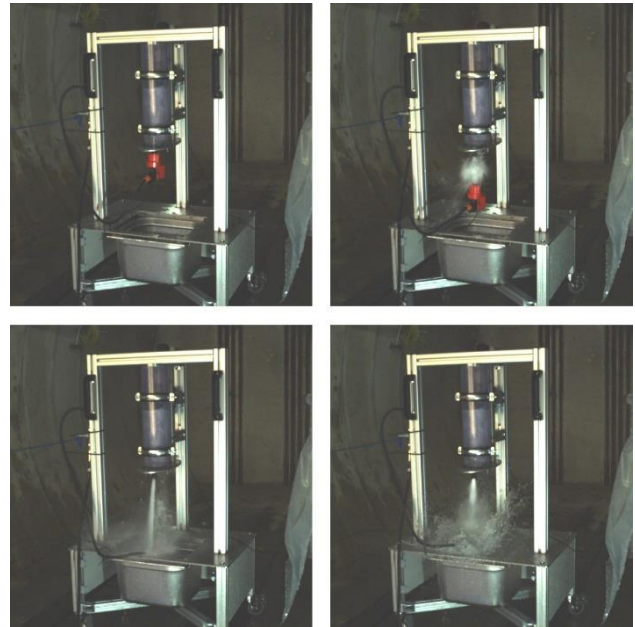


BILD 7. Auslösen der Kupplungseinheit bei 8 bar

5.8. Bersttest

Für die maximale Belastung der PET-Flasche wurde ein Bersttest durchgeführt. Hierzu wurde die Flasche auf einen Druck von 12 bar (DBP) bedrückt bis sich der Druck eingestellt hat. Danach wurde der Druck stufenweise weiter erhöht. Dieser Test wurde dreimal durchgeführt. Die maximal erreichten Drücke der Flaschen sind in Tabelle 3 gezeigt.

Flaschen Nr.	Berstdruck [bar]
1	14
2	15,5
3	14

TAB. 3 Berstdrücke der PET-Flasche

Zwischen der Flasche Nr. 1 und 2 wurde eine Modifikation am Schubprüfstand vorgenommen, da es aufgrund des Sicherheitszylinders um die PET-Flasche zu umherfliegenden Teilen kam. In BILD 8 sind im roten Kreis die Reste der PET-Flasche, sowie der offene Bereich des PVC-Zylinders zu sehen. Dies stellte am Prüfstand „Vierblock“ zu keiner Zeit eine Gefahr dar, sollte aber im normalen Betrieb nicht vorkommen. Aufgrund dessen wurde der Sicherheitszylinder gekürzt und die Schwachstelle des Systems liegt jetzt in der

Gewindestange zum Kraftsensor, sodass sich diese frei verformen kann um die Kraft aufzunehmen, die Splitter der PET-Flasche werden vom PVC-Zylinder aufgenommen. Mit dem modifizierten Aufbau wurden der zweite und dritte Bersttest erfolgreich und ohne umherfliegende Bauteile durchgeführt (siehe BILD 9).



BILD 8. Bersttest mit der Flasche Nr. 1 vor der Modifikation



BILD 9. Bersttest mit der Flasche Nr. 2 nach der Modifikation

Für die energetische Betrachtung, die die Wasserrakete

beim Maximaldruck erreicht, wird die Druckenergie berechnet. Diese ergibt sich aus nachfolgender Gleichung [1]:

$$E = p \cdot V. \quad (3)$$

Der Maximaldruck p beträgt 14 bar und das Volumen des Gases ist 0.00067 m^3 . Damit ergibt sich eine Energie von 940 J die bei der Desintegration freigesetzt wird. Zum Vergleich sei hier die Geschossenergie einer 9-mm-Pistole genannt, die bei ca. 550 J liegt [8]. Es wird deutlich, dass die Gefahr, die von einer einfachen Wasserrakete beim Bersten ausgeht nicht zu unterschätzen ist und Gegenmaßnahmen für den Fall der Desintegration getroffen werden müssen, um alle Beteiligten zu schützen. An dieser Stelle sei jedoch auch angemerkt, dass eine handelsübliche Fahrradpumpe die erforderlichen Drücke, die zum Bersten einer PET-Flasche benötigt werden, nicht erreichen kann und somit schon höhere Gewalt oder ausgereiftere Technik benötigt wird, um den Druck aufzubringen.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Für die erfolgreiche Qualifikation des Schubprüfstandes für Wasserraketen vom DLR_School_Lab aus Braunschweig wurden Versuche auf dem Prüfstand „Viererblock“ des DLR Trauen durchgeführt. Dabei bot die amerikanische Norm ANSI/AIAA S-080A-2018 die Grundlage für die Testdurchführung.

Der Betriebstest des Prüfstandes hat hervorragend funktioniert. Ebenfalls konnte keine Leckage der PET-Flasche festgestellt werden. Für die Zyklusqualifikation konnten insgesamt 117 Zyklen erfolgreich durchgeführt werden. Der Berstdruck der PET-Flasche liegt bei mindestens 14 bar und ist damit weit oberhalb der im Betrieb des Experimentes auftretenden Drücke. Bei den Berstversuchen konnte der Schubprüfstand modifiziert werden und weitere Verbesserungen nach Auswertung identifiziert und umgesetzt werden, sodass das Sicherheitskonzept im Berstfall ordnungsgemäß funktioniert.

Die Testkampagne erreichte alle definierten Qualifikationsziele und konnte den Schubprüfstand für den operationellen Einsatz qualifizieren. Somit steht er für die Nachwuchsförderung im Bereich der Raketentechnik zur Verfügung.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Amtsblatt der Europäischen Union: Richtlinie 2014/68/EU. 2014.
- [2] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 13445 – Unbefeuerte Druckbehälter. 2021.
- [3] American Society of Mechanical Engineers (ASME): Boiler and Pressure Vessel Code. 2023.
- [4] American Institute of Aeronautics and Astronautics: Space Systems – Metallic Pressure Vessels, Pressurized Structure and Pressure Components. 2018. ANSI/AIAA S-080A-2018
- [5] G. Poppe, S. May, N. M. Bierwagen, Th. Eggers: The site Trauen of the German Aerospace Center – Past, Present and Future of the largest test site for rocket engines in Germany, 3rd Ground-Based Space

Facilities Symposium, Marseille, France, 2022, 6-8 December.

- [6] O. Bozic, D. Porrmann, D. Lancelle, A. Hartwig: Program AHRES and its contribution to assess features and current limitations of hybrid rocket propulsion, 63th International Astronautical Congress, Naples, Italy, 2012, 1-5 October.
- [7] A. Dabanovic, J. Martin, S. May, Th. Eggers: Design of a sounding rocket upper stage based on the hybrid rocket engine VISERION, CEAS Space Journal Vol. 15 (2023) 467-476.
- [8] Wikipedia: Geschossenergie. <https://de.wikipedia.org/wiki/Geschossenergie> (zuletzt aufgerufen am 12.08.2025)